第 38 卷第 8 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.8
2018 年 4 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201705240966
张功,郑宁,张劲松,孟平.光闪烁方法测算区域蒸散研究进展.生态学报,2018,38(8):2625-2635.
Zhang G, Zheng N, Zhang J S, Meng P.Advances in the study of regional-averaged evapotranspiration using the scintillation method.Acta Ecologica Sinica,2018,38(8):2625-2635.

光闪烁方法测算区域蒸散研究进展

张　功[1,2,3],郑　宁[1,2,3],张劲松[1,2,3,*],孟　平[1,2,3]

1 中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091
2 国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091
3 南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037

摘要:蒸散是土壤-植物-大气连续体(SPAC)水热运移的一个重要环节,是全球水量平衡的重要组成,一直是气象学、水文学、地理学及生态学等相关学科重要的研究主题。区域尺度地表蒸散的时空变化过程十分复杂。迄今为止,在像元尺度水平上,特别在非均匀下垫面和地形起伏条件下,有代表性的进行地表蒸散的观测仍然十分困难。虽然遥感方法可获得区域尺度水平蒸散,但其主要根据经验或半经验模型对区域蒸散进行估算,模型选用的参数以及结果还需地面实测数据进行改进、优化,如何获得与遥感尺度相应的地面蒸散实测数据成为模型验证的重点和难点,光闪烁方法的出现为上述问题的解决带来了希望。光闪烁方法能够适应复杂下垫面,测量结果准确且具有时空平均等优点,成为测量区域蒸散的有效方法、验证遥感模型结果的最佳手段。从理论原理、计算方法、主要应用情况等方面,概述了光闪烁方法观测区域蒸散研究进展,指出了影响测算精度的不确定性因素,并提出了研究展望,旨在进一步推动该方法在区域蒸散观测研究中的应用,促进相关学科的发展。

关键词:区域平均蒸散;大孔径闪烁仪;微波闪烁仪;遥感;通量

Advances in the study of regional-averaged evapotranspiration using the scintillation method

ZHANG Gong[1,2,3], ZHENG Ning[1,2,3], ZHANG Jinsong[1,2,3,*], MENG Ping[1,2,3]

1 *Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*
2 *Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Beijing* 100091, *China*
3 *Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*

Abstract: Evapotranspiration is key to hydrological and heat transfer in the soil-plant-atmosphere continuum (SPAC). It is also an important component of water and energy balances, and now it is becoming an important research subject in meteorology, hydrology, ecology and other related areas. The temporal and spatial variations in surface evapotranspiration at the regional scale are very complicated, which means that it is still difficult to measure surface evapotranspiration at the kilometer scale above a heterogeneous underlying terrain. Remote sensing methods can provide regional evapotranspiration results by using an empirical or semi-empirical model, but the parameters in the models and the outputs need to be improved and optimized according to the real-time measurement results. The difficulty with model verification is how to obtain surface evapotranspiration at the kilometer scale. However, the development of the scintillometry method may be able to solve this problem. The scintillometry method can adapt to complex surfaces, and produces accurate results when both time and space are averaged. This method has become an effective way to measure regional evapotranspiration and may be

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500101);国家自然科学基金项目(31500363);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAFYBB2016QB001)

收稿日期:2017-05-24;　　**网络出版日期**:2018-01-08

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangjs@ caf.ac.cn

the best way to verify the outputs of remote sensing models. This study discusses the background theory to the scintillometry method, summarizes the potential applications of the method, and analyzes the uncertainties in the hardware equipment, the environmental factors, and key parameters in the calculation. Finally, we put forward research prospects based on theoretical principle, the calculation method, and potential applications. Our summary and analysis can be used to promote the application of the scintillometry method in regional evapotranspiration measurements and relevant disciplines.

Key Words: regional-averaged evapotranspiration; large aperture scintillometer; microwave scintillometer; remote sensing; flux

蒸散是土壤-植物-大气连续体水热运移的重要环节,是全球水循环的重要组成部分。在全球气候变化的背景下,气温、降水均发生了显著的变化,水循环的加速导致区域水资源分布不均匀的现象更为严重。因此,蒸散的观测已成为气象学、水文学、地理学及生态学等相关学科共同关注的热点主题[1-4]。深入了解蒸散过程对天气预报、干旱监测、区域水资源管理及全球变化等研究具有重要意义。

蒸散过程复杂,涉及范围广,包括中小尺度(几百米范围)和区域尺度(公里范围),其中以波文比-能量平衡法、梯度迭代法、空气动力学方法、涡度相关方法以及蒸渗仪法等计算、观测方法为主的中小尺度蒸散研究成果丰硕,近十年来涡动相关方法因其准确快速的优点常被研究者认为是蒸散观测的标准方法[5-7]。由于全球变化和流域水文研究的需要,区域尺度的蒸散研究越来越受到重视[4,8]。然而公里尺度的区域蒸散过程影响机制较多[3,9],涡动相关方法观测结果并不理想。若将基于中小尺度的单点式测量结果扩展到区域尺度,必须考虑下垫面的异质性,如植被的覆盖率、地形的起伏程度等,同时还需考虑大气状态的平稳性、湍流的发展以及局地微气象条件的差异,因此要获得区域平均蒸散需建立观测网络[10]。近年来,利用遥感信息估算大尺度地表蒸散,即遥感模型法,成为观测区域蒸散的有效技术之一,但该技术通常是根据经验或半经验模型对区域蒸散进行估算[11-12]。由于对蒸散过程中许多关键要素的参数化计算方法不是十分成熟,下垫面的非均匀性导致遥感蒸散模型在不同区域的适用性不同以及遥感反演地表参数的不确定性等,遥感模型结果必须结合地面观测数据进行验证改进,模型参数也需要结合地面实测数据进行优化[12-13]。如何获得与遥感蒸散模型尺度相应的地面蒸散实测数据成为模型验证的前提和重点,也是遥感水文监测的技术瓶颈。20 世纪 70 年代发展的基于湍流大气光传播理论与相似理论相结合光闪烁方法为上述问题的解决带来了希望。

1978 年 Wang 提出了利用光闪烁法测量通量的假设,美国 NOAA 波传播实验室将此假设变成了可能[14-15]。随后的几十年间,基于近红外光、微波、可见光的各种光闪烁方法测量通量的仪器迅速发展,并于九十年代中后期开始用于实际观测研究。光闪烁方法主要分为"单波长方法"和"双波长方法"。单波长方法是基于近红外方式(0.67—0.94μm)的光闪烁仪器,此类仪器主要包括小孔径闪烁仪、大孔径闪烁仪和超大孔径闪烁仪,其中 SAS 测量距离仅为 200—250m,XLAS 的测量距离可达 10km,目前光闪烁方法的应用以 LAS 为主[15]。与单波长方法不同,双波长方法是通过红外-微波联合系统工作,该联合系统包括近红外闪烁仪和微波闪烁仪,目前 OMS 尚处于初级阶段。2000 年,中荷合作项目"中国能量与水平衡监测系统"首次引进 LAS 以来,先后在黄河流域、黑河流域、海河流域、黄土高原、青藏高原等地方展开了针对 LAS 的专门研究,并成功研制出具有自主知识产权的闪烁仪[14-15]。光闪烁方法可以测量区域范围内的平均通量,既弥补了传统观测方法空间代表性不足的问题,同时也与遥感的象元尺度匹配度高,较好地验证了遥感模型的反演结果[16-17]。本文从光闪烁方法的理论原理出发,着重介绍该方法在区域蒸散测量领域的计算方法,概述了该方法测算区域蒸散的研究进展,分析了该方法在应用计算过程中的不确定性并对其在今后的研究热点进行展望,旨在进一步推动该方法在区域蒸散观测研究中的应用。

1 光闪烁方法测定显热和潜热的原理

光在湍流大气中传播,由于空气温度、湿度和压强的波动引起大气折射率发生变化,从而导致光束的频

率、振幅、强度等出现了无规则的变化,产生了所谓的“光闪烁”现象[15-16]。光闪烁方法就是根据接收光强变化的信号来按公式(1)来测定空气折射指数结构参数(C_n^2):

$$C_{n,\mathrm{LAS}}^2 = 1.12\sigma_{\ln I}^2 D^{7/3} L^{-3} \tag{1}$$

$$l_0 \leqslant F \leqslant D \leqslant L_0 \tag{2}$$

式(2)是式(1)的限定条件。式中 $C_{n,\mathrm{LAS}}^2$ 是 LAS 测算出的空气折射指数结构参数 ($\mathrm{m}^{-2/3}$);$\sigma_{\ln I}^2$ 为接收光强信号的自然对数方差;D 为闪烁仪的孔径尺寸(m);L 为光路长度(m);l_0为湍流结构内尺度(m);F 为菲涅耳尺度(m);L_0为湍流结构外尺度(m)。

C_n^2 受空气的温度(T)、湿度(q)以及气压(P)的波动而发生变化,因此可用温度结构参数(C_T^2)、湿度结构参数(C_q^2)和温度与湿度的协方差项(C_{Tq})表示如下:

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{\bar{T}^2}C_T^2 + \frac{2A_TA_q}{\bar{T}\bar{q}}C_{Tq} + \frac{A_q^2}{\bar{q}^2}C_q^2 \tag{3}$$

式中,A_T、A_q分别是温度、湿度结构参数系数(/);$\bar{T}$ 是平均温度(K);$\bar{q}$ 表示平均湿度(kg/kg)。

在近红外方式工作时,温度的波动对 C_n^2 的影响最大,A_T比 A_q大 2—3 个量级。为了便于计算,假设温度和湿度的相关系数为 1,并引入表示波文比系数(β)对公式(3)进行了简化:

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{\bar{T}^2}C_T^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta}\right)^2 \tag{4}$$

式中,$\bar{T}$ 是空气温度(K),β 为波文比系数(/)。

在红外-微波双波长工作方式下,不仅需要根据公式(1)计算近红外波段的 $C_{n,\mathrm{LAS}}^2$,同时还需根据公式(5)计算微波波段的 $C_{n,\mathrm{MWS}}^2$:

$$C_{n,\mathrm{MWS}}^2 = 2.015\sigma_{\ln I}^2 \kappa^{-7/6} L^{-11/6} \tag{5}$$

式中,κ 是空间波数($2\pi/\lambda$,λ 为波长,m),L 为光路长度(m),$\sigma_{\ln I}^2$ 为接收光强信号的自然对数方差(/)。公式(3)因此出现了两种不同波长形式表达。为顺利计算出 C_T^2 、C_q^2 ,假设 $C_{Tq} = \pm R_{Tq}\sqrt{C_T^2 C_q^2}$,R_{Tq} 是经验值,常取 ±1[18]。

$$C_q^2 = \frac{A_{T,\mathrm{MWS}}^2 C_{n,\mathrm{LAS}}^2 + A_{T,\mathrm{LAS}}^2 C_{n,\mathrm{MWS}}^2 + 2R_{Tq}A_{T,\mathrm{MWS}}A_{T,\mathrm{LAS}}\sqrt{C_{n,\mathrm{LAS}}^2 C_{n,\mathrm{MWS}}^2}}{(\Gamma\bar{T})^2} \tag{6}$$

$$C_T^2 = \frac{A_{q,\mathrm{MWS}}^2 C_{n,\mathrm{LAS}}^2 + A_{q,\mathrm{LAS}}^2 C_{n,\mathrm{MWS}}^2 + 2R_{Tq}A_{q,\mathrm{MWS}}A_{q,\mathrm{LAS}}\sqrt{C_{n,\mathrm{LAS}}^2 C_{n,\mathrm{MWS}}^2}}{(\Gamma\bar{q})^2} \tag{7}$$

式中,$\Gamma = \dfrac{A_{T,\mathrm{MWS}}A_{q,\mathrm{LAS}} - A_{T,\mathrm{LAS}}A_{q,\mathrm{MWS}}}{\bar{T}\bar{q}}$ 。A_T和 A_q的下标分别表示在 LAS 与 MWS 工作波段下的温湿度参数取值。这种根据假设计算的方法,被称为“Hill 双波长法”或“双波长假设法”。Lüdi 等[19]认为波文比系数变化时,R_{Tq}也会发生变化,假设 $R_{Tq}=\pm1$ 的理想条件并非总是成立,因此提出获得实时 R_{Tq}值的交互方法,称为“双波长相关法”或“Lüdi 双波长方法”。该方法不仅可以计算出 $C_{n,\mathrm{LAS}}^2$ 和 $C_{n,\mathrm{MWS}}^2$,而且同时计算出近红外与微波交互的空气折射指数结构参数 $C_{n,OMS}^2$ 。其中 $C_{n,OMS}^2$ 的计算公式如下:

$$C_{n,OMS}^2 = Ak^{-7/6}L^{-11/6}\sigma_{\ln I}^2 \tag{8}$$

式中,A 是待定系数,与 LAS、MWS 的路径长度和其间距有关,具体计算方式可参考 Lüdi 等[19]。公式(3)因此可变成 3 种不同表现形式,联立可得 C_T^2 、C_q^2 以及 C_{Tq} 如下:

$$\begin{pmatrix} C_T^2 \\ C_{Tq} \\ C_q^2 \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} C_{n,\mathrm{LAS}}^2 \\ C_{n,\mathrm{MWS}}^2 \\ C_{n,OMS}^2 \end{pmatrix} \tag{9}$$

式中, M^{-1} 为逆矩阵,参考表达式如下:

$$M^{-1} = \frac{\bar{T}^2 \bar{q}^2}{(A_{T,\mathrm{LAS}}A_{q,\mathrm{MWS}} - A_{T,\mathrm{MWS}}A_{q,\mathrm{LAS}})^2} \times \begin{bmatrix} \frac{A_{q,\mathrm{MWS}}^2}{\bar{q}^2} & \frac{A_{q,\mathrm{LAS}}^2}{\bar{q}^2} & \frac{-2A_{q,\mathrm{LAS}}A_{q,\mathrm{MWS}}}{\bar{q}^2} \\ \frac{-A_{T,\mathrm{MWS}}A_{q,\mathrm{MWS}}}{\bar{T}\bar{q}} & \frac{-A_{T,\mathrm{LAS}}A_{q,\mathrm{LAS}}}{\bar{T}\bar{q}} & \frac{A_{T,\mathrm{LAS}}A_{q,\mathrm{LAS}} + A_{T,\mathrm{MWS}}A_{q,\mathrm{MWS}}}{\bar{T}\bar{q}} \\ \frac{A_{T,\mathrm{MWS}}^2}{\bar{T}^2} & \frac{A_{T,\mathrm{LAS}}^2}{\bar{T}^2} & \frac{-2A_{T,\mathrm{LAS}}A_{T,\mathrm{MWS}}}{\bar{T}^2} \end{bmatrix} \tag{10}$$

根据莫宁-奥布霍夫相似理论(MOST)存在如下关系:

$$\frac{C_T^2 (z-d)^{2/3}}{T_*^2} = f_T(\frac{z-d}{L_{MO}}) \tag{11}$$

$$\frac{C_q^2 (z-d)^{2/3}}{q_*^2} = f_q(\frac{z-d}{L_{MO}}) \tag{12}$$

式中, z 为有效高度(m), d 为零平面位移(m), T_* 为温度变量(K), q_* 为湿度变量(kg/kg), f_T 为 MOST 普适函数, L_{MO} 为奥布霍夫长度。其中,

$$L_{MO} = -\frac{u_*^2 \bar{T}}{g\kappa T_*} \tag{13}$$

式中, g 为重力加速度(9.81m/s^2), u_* 为摩擦风速(m/s), κ 为 von Karman 常数(0.4)。由于 L_{MO} 受 H 和 u_* 的影响,上述公式通常无法得出 H 或 L_vE 的解析解,对于红外-微波双波长工作方式的光闪烁法需结合下式进行迭代运算。

$$H = -\bar{\rho} c_p u_* T_* \tag{14}$$

$$L_vE = -\frac{\bar{\rho}}{(1-\bar{q})} L_v u_* q_* \tag{15}$$

$$E_T = \frac{L_vE}{L_v} \tag{16}$$

式中, $\bar{\rho}$ 为空气密度(1.2kg/m^3), c_p 为空气比热(1005J/(kg·K)), $\bar{q}$ 是绝对湿度(g/m^3), L_v 是蒸发潜热(kJ/kg), H 为显热通量(W/m^2), L_vE 是潜热通量(W/m^2), E_T 是蒸散量(mm)。对于近红外方式工作的光闪烁方法只能迭代计算出 H,然后根据能量平衡方程,利用余项法得出 L_vE:

$$L_vE = R_n - G_s - H \tag{17}$$

式中 R_n 是净辐射(W/m^2), G_s 是土壤热通量(W/m^2)。

MOST 普适函数通常分为如下两种:

不稳定状态($\zeta < 0$):

$$f_T(\zeta) = x_{T,1}(1 - x_{T,2}\zeta)^{-2/3} \quad f_q(\zeta) = x_{q,1}(1 - x_{q,2}\zeta)^{-2/3} \tag{18}$$

稳定状态($\zeta \geq 0$):

$$f_T(\zeta) = x_{T,1}(1 + x_{T,2}\zeta)^{2/3} \quad f_q(\zeta) = x_{q,1}(1 + x_{q,2}\zeta)^{2/3} \tag{19}$$

式中 $\zeta = \frac{z-d}{L_{MO}}$ 是稳定度函数, $x_{T,1}$, $x_{T,2}$, $x_{q,1}$, $x_{q,2}$ 是 MOST 的函数系数。

此外,也有使用可见光、近红外、微波 3 个波段联合的方法进行蒸散测算[20-21],虽然这些实验表明了使用 3 个波段工作的可行性,但实验结果并不理想,且技术要求高、成本昂贵,逐渐失去了吸引力。

2 光闪烁方法观测蒸散的研究进展

2.1 单波长方法

以近红外方式工作的单波长光闪烁方法通常以波长为 880nm 或 940nm 的 LAS 为主要观测仪器。该方法

发展初期,在平坦下垫面条件下对其进行观测研究,并与涡动相关方法测量结果进行比较。Purerua 半岛的平坦草原进行的多次观测实验结果表明,LAS 的测量结果与涡动相关方法的结果较好,标准误差在 25W/m^{2}之内,并认为 LAS 可以在短时间内获得路径上的平均通量,其统计不确定性较小[22]。Cain 等[23]在牛津的实验结果表明 LAS 与涡动相关方法的观测结果一致性较高。同类研究还包括 Kohsiek 等[24]利用 XLAS 进行实验、Hoedjes 等[25]在墨西哥西北部实验以及 Beyrich 等[26]在德国东北部的实验等,这些实验结果表明:LAS 的测量结果与涡动相关方法测量结果一致性显著。国内在 2000 年首次引进 LAS 以来,结合相关气象资料,分别对乐至、乾安、郑州等地区初步进行水热通量的研究对比,结果认为 LAS 测量的显热通量与当地的气温差相关性显著,结合净辐射资料得出的蒸散值均能反映当地能量的季节变化规律[27-28]。随后黄河流域、海河流域、黑河流域、黄土高原、青藏高原等不同地区的 LAS 应用试验表明,LAS 观测结果与涡动相关方法、波文比方法测量结果一致性很高[14,17,29-30]。其他研究如在农田生态系统、半干旱地区以及干旱地区等结果也表明光闪烁方法测量区域通量结果可靠[31-33]。

实际研究中,区域尺度的下垫面大部分是非均匀的,由于地形起伏、植被异质等客观因素的存在,光闪烁方法在复杂下垫面条件下的适用性颇受关注。Hemakumara 等[34]在斯里兰卡 Horana 的混合植被区进行实验,结果表明 LAS 所测蒸散量符合当地的气候条件,并能随着天气的条件发生变化,由此拉开了光闪烁方法在非均匀下垫面条件应用的序幕。Beyrich 等[26]对德国东北地区森林和农田混合区域研究时,将各地段测得的通量利用权重函数求和得到区域平均通量,该结果与光闪烁方法吻合度很高。张劲松等[35]在地形起伏的中国北方低地山丘人工混交林的研究中将两台涡动相关方法的观测结果进行权重叠加,所得结果与光闪烁方法测量结果的相关性系数可达 0.93。Chehbouni 等的实验中也得出相同的结论[36]。郝小翠等[37]研究陇东黄土高原下垫面不均匀性对光闪烁方法的影响,发现地表不均匀性对测量结果影响显著。在非均匀下垫面时,由于地形条件等因素的存在,应用光闪烁方法测量时,相似理论未必成立,但上述非均匀下垫面的实验结果表明,考虑采样尺度,并利用权重函数对不同地段通量值进行修正,光闪烁法同样可以取得良好结果。光闪烁方法在非均匀下垫面的良好结果说明,光闪烁方法在实际应用中可以与遥感模型进行对比验证。Watts 等[38]根据 AVHRR 数据以及 LAS 观测结果对墨西哥北部半干旱地区的地表通量进行研究,认为 LAS 能较好反映出该地区的通量变化;Meijninger 等[31]在土耳其西部灌溉区域用 LAS 分别测量 2700m 和 670m 距离的通量值,结果与 LANDSAT 结果具有良好的一致性,并认为 LAS 可作为独立的区域平均能量观测系统。Nobuhle 等[39]对南非不同生态气候区的研究表明,光闪烁方法测量结果与卫星遥感模型运算结果一致性高。同样结果也出现在黑河流域、青藏高原等实验中[14,17,29]。总体说来,以近红外方式工作的光闪烁方法适应不同条件下垫面,且该技术已经成熟,已经实现了商业化生产,其中常见的有荷兰 Kipp&Zonen 公司和德国 Scintec 公司。单波长方法观测结果与遥感模型结果吻合度高,已成为检验卫星遥感反演模型的最佳方法[14,25,29]。

2.2　双波长方法

红外-微波双波长方式工作的光闪烁方法还处于起步阶段。Kohsiek 等[40]最先采用波长为 10mm、发射频率为 30GHz 的微波成功计算出潜热通量,并认为 C_T^2, C_q^2 与 C_{Tq} 存在某种关系,甚至认为同时假设 C_T^2 与 $\sqrt{C_T^2C_q^2}$ 的关系以及 C_T^2/C_q^2 的取值后,使用单独波段即可实现水汽通量的计算。1988 年 Hill 采用 173GHz 的频率研究认为低频波动的水汽会对结果产生影响,首次完整提出"双波长"方法计算过程,并假设 $C_{Tq} = \pm R_{Tq}\sqrt{C_T^2C_q^2}$,其中 $R_{Tq}=1$[41]。McMillan 等[42]系统地分析了不同波长测量的结果,并认为理想波长为 11mm 或3.2mm。从对水汽敏感程度以及成本因素考虑,这两种波长成为以后 MWS 试验的首选。Lüdi 等[19]认为假设 R_{Tq}的方法并不能真实反映出波文比,并利用微波和近红外交互测量的方法得出与涡动相关方法具有高吻合度的结果。Meijninger 等[43]验证了双波长方法在非均匀下垫面测算区域蒸散的可行性。Ward 等[44]在英国 Swindon 城郊区域利用双波长方法研究水热通量,测量结果变化趋势明显,与涡动相关方法结果一致性较高。国内关于双波长方法的研究较少,舒婷[45]对双波长方法测量区域蒸散进行研究,研制了一套监测范围在 600m 以内的设备,并在中国北方草原下垫面条件下进行观测,结果表明双波长方法得到的显热通量与涡动相

关方法测量结果相关系数为 0.96,潜热通量的相关系数达到 0.76,表明该系统在草地下垫面条件下具有一定的可行性。

总体说来,80 年代关于双波长方法的研究主要在理论阶段,包括敏感波段的选择, C_{Tq} 的取值,空气折射率结构参数与温度、湿度结构参数的关系等方面。在应用过程中,荷兰 Wageningen 大学利用双波长方法在不同地形条件下测算区域平均蒸散,修正了部分计算方法,推动了微波闪烁仪的发展;荷兰 Eindhoven 大学设计了波长为 11mm,频率为 27GHz 的微波闪烁仪,常与 LAS 联合应用在多个陆面实验中,瑞士 Bern 大学,对双波长测算方法和过程中的关键参数进行研究,提高了测算精度[46];德国 Radiometer Physics GmbH 公司率先研发了波长为 1.86mm,频率为 160GHz 的商业化微波闪烁仪,为双波长的发展提供了硬件支持。

3 光闪烁方法测量区域蒸散的不确定性

3.1 仪器自身限制所引起的不确定性

光闪烁方法利用测得的 C_n^2 结合 MOST 进而实现对区域蒸散的估算。因此光闪烁方法的仪器,如 LAS、MWS 等,会因其自身的局限性,如孔径尺寸、响应时间等,在大气平稳状态或湍流很强的状态都会造成波动信号的偏差,其中最显著的问题就是信号饱和。Kohsiek 等[47]对 LAS 研究发现,发生饱和现象时会使观测结果偏低约 20%。也有研究表明 LAS 观测数据的误差会随信号强度的降低而增大[48]。目前针对饱和信号的处理方法已有不同方法进行研究,如将 $0.193L^{-8/3}\lambda^{1/3}D^{5/3}$($L$ 为路径长度,λ 为闪烁仪所用波长,D 为闪烁仪孔径长度;下同)作为信号阈值,也有研究表明信号阈值强度为 $0.074L^{-8/3}\lambda^{1/3}D^{5/3}$ 或 $0.099L^{-8/3}\lambda^{1/3}D^{5/3}$,可采用饱和修正因子的方法或几何路径长度方法对饱和信号进行修正,但这些研究均存在不足,所得结果也有差异[48-49]。水汽也会对光信号产生吸收效应,由于此效应的存在,光闪烁方法的观测结果一般存在 10%左右的误差,极端条件甚至能达到 80%,但是由于水汽吸收引起的误差可通过适当的滤波方式来降低[44]。

光闪烁方法的仪器也存在系统误差。以 LAS 为例,荷兰 Kipp&Zonen 公司同型号闪烁仪间的观测误差可达 21%,德国 Scintec 公司同型号闪烁仪观测误差为 3%左右[50-51]。刘绍民等[16]在密云站的比较也得出 LAS 系统间存在误差,并且试验中发现 Kipp&Zonen 的 LAS 结果比 Scintec 的 BLS 型号闪烁仪观测的结果存在 17%左右的误差。

双波长方法采用两套不同波长的仪器协同工作,为获得较为可靠的信号,通常使用高频信号观测然后进行滤波处理。然而不同研究者,所使用的频率,采用的波长各不相同,如表 1 所示。

表 1 双波长方法中微波选择

Table 1 Selection of micro-wave in two-wave-length method

作者、年份 Author, Year	波长 Wave-length/mm	频率 Frequency/GHz	实验地点 Set-up site
Kohsiek 等(1983)[40]	10	30	Eindhoven,荷兰
Hill 等(1988)[41]	1.7	173	Flatville,美国
Green 等(2001)[52]	11	27	Kaitaia,新西兰
Lüdi 等(2005)[19]	3.2	94	Lindenberg,德国
Meijninger 等(2006)[43]	11	27	Flevoland,荷兰
Evans(2009)[53]	3.2	94	Sheepdrove,英国
Ward 等(2015)[44]	3.2	94	Swindon,英国
Mei Sun Yee 等(2015)[32]	3.2	26,38	Yanco,澳大利亚

研究表明[18,20,40],波长的选择对蒸散结果具有显著影响。如 Andreas[18]在研究中指出,波长为 3.33mm 时,波文比在 0.1—10 范围内,估算的蒸散会有 20%的误差,当波文比在 0.01—0.5 时,结果会有 10%的偏差。

3.2 环境因素引起的不确定性

蒸散是水汽传输过程的反映,准确获取蒸散量主要取决于对空气中热量和水汽含量的精确测定。波文比为显热通量与潜热通量的比率,主要与空气温湿度有关,可以用来表征周围环境的干湿状况。单波长方法的

研究中,使用波文比来表征水汽含量,在不改变计算中的其他参数时,波文比系数由 1 变成 0.3 时可造成 15% 的误差[31]。研究也表明,波文比在 0.1—2 之间变化时结果的标准差在 0.4 左右变化,对结果的不确定性影响可达 50%,并认为当波文比大于 0.32 时,对结果至少产生 10%的影响,由此建议用饱和水汽压来表征空气湿度[54-55]。Lüdi 等[19]在研究中用绝对湿度表示空气湿度,结果表明当波文比系数小于-2 时,相关性低至-0.6,而当波文比系数大于 2 时,相关性为 0.8。双波长方法中研究人员多倾向使用绝对湿度,而 Ward 等[56]认为绝对湿度受温度影响较大,是变量;比湿独立于温度,相对保守,并在 Swindon 的城郊中用绝对湿度研究,结果与涡动相关方法仅相差 8%[44]。在光闪烁方法中,如何真实地表示空气湿度状况还有待进行更深入的研究。

满足相似理论(MOST)是光闪烁方法测量区域蒸散的前提。不同的植被覆盖面积、土地利用方式和地形起伏等因素造成了实际观测区域的非均匀性,光径高度随地形起伏不断变化。为解决 MOST 在不均匀地表的适用性问题,提出了“掺混高度”概念,并认为在此高度条件下所有通量能够充分混合[43],而 Hartogensis 等[57]研究认为,在不稳定状态下以及 MOST 有效时,光路径上的通量值主要受路径权重函数的影响,提出“有效高度”的概念,并认为当路径距离大于 5km 时,由于地球曲面的影响会产生 0.5m 的偏差;Evans 等[53]研究“双波长”系统的有效高度,认为在理想的下垫面条件下有效高度引起的误差不足 1%,但在地形起伏较大的情况下有 5%—10%的误差,且路径权重函数对路径终端的影响也较为显著。Ward 等[44]认为不同的有效高度对结果产生 6%或 3%的偏差。地形起伏导致光径高度发生变化,MOST 的表达形式因此受到影响,虽然大量实验得到的观测资料计算分析出的函数表达形式基本相似(公式(18)、(19)),但是函数表达式的具体参数仍然相差很大。由于湍流运动及其影响机制的复杂性,在不同条件下的观测实验仍然无法得到一致的函数表达式的具体参数,如表 2 所示。

表 2　不同研究中的 MOST 函数系数取值

Table 2　Coefficients of MOST function in different research

系数 Coefficients	MOST 函数系数 Coefficients of MOST function							
	不稳定状态 Unstable				稳定状态 Stable			
	$x_{T,1}$	$x_{T,2}$	$x_{q,1}$	$x_{q,2}$	$x_{T,1}$	$x_{T,2}$	$x_{q,1}$	$x_{q,2}$
Wyngaard 等(1973)[58]	4.9	7	—	—	4.9	2.75	—	—
Andreas (1988)[59]	4.9	6.1	—	—	4.9	2.2	—	—
Hill 等(1992)[60]	8.1	15	—	—	—	—	—	—
Hartogensis 等(2005)[61]	4.9	9	—	—	4.7	1.6	—	—
Li 等(2012)[62]	6.7	14.9	3.5	4.5	4.5	1.3	3.5	2.4
郑宁(2013)[63]	4.91	6.51	—	—	6.43	2.2	—	—
Ward 等(2015)[44]	4.84	11.6	4.84	11.6	4.9	2.2	4.9	2.2

MOST:相似理论,Monin-Obukhov Similarity Theory;$x_{T,1}$,$x_{T,2}$,$x_{q,1}$,$x_{q,2}$:MOST 函数的系数,coefficients of MOST function

不同的普适函数关系式对蒸散结果影响可达 10%—15%,并认为在不稳定状态下 MOST 的适用性比在近中性或稳定状态时好,湍流越强,适用性越好[63]。由于 MOST 要求观测试验尽可能处于均一、稳定的观测条件下进行,但当热力湍流的作用减小,主要是机械剪切力、重力及平流的作用,MOST 适用条件在此种稳定度条件下不再满足,这也导致了不同普适函数计算结果差异很大。闪烁仪测量的是大气湍流强度,并不能判断水热通量的输送方向。大气稳定度的判断及 MOST 函数的选取直接影响到闪烁仪观测的数据质量,因此许多研究人员只分析白天观测数据,很少考虑夜间观测结果。目前对于普适函数的选择尚无统一标准,尤其利用光闪烁方法计算稳定条件下的通量还存在较多问题。

3.3　计算过程的不确定性

利用单波长方法,通过能量平衡的方法计算蒸散会造成低估,即使利用波文比修正方法进行湿度订正后,结果仍有 16%的偏差[43],其原因通常认为是用能量平衡余项法时参与计算的净辐射(R_n)和土壤热通量(G_s)的空间代表性不足以代表测量区域的均值。在利用能量平衡余项法时,净辐射(R_n)和土壤热通量(G_s)是非常重要的参数,在非均匀下垫面时的空间差异性需要仔细测算。在复杂下垫面条件时,粗糙度长度、零平面位

移以及光径有效高度等重要参数会随着下垫面的实际情况而发生变化,存在不确定性。

应用双波长方法中的"Hill 双波长"方法时,大多数学者假设 $R_{Tq}=\pm1$。实际研究表明,当 $R_{Tq}=+1$ 时,其结果不能很好地反映半干旱地区的蒸散状况[32],研究发现,不稳定状态时,R_{Tq} 取+0.7 至+0.95 范围更适合[19,44]。这种假设对于非理想条件并非总是成立,因此 Lüdi 等提出实时获得 R_{Tq} 的交互方法,并认为当环境波文比系数范围变小时,R_{Tq} 的范围也会缩小,并认为 R_{Tq} 取值会对蒸散结果产生 20%—50%的偏差[19]。"Lüdi 双波长方法"获得实时 R_{Tq} 的值,但该方法中所用的公式(8)中的系数 A 要依据具体安装方案来定,仪器的间距以及光路径长度的测量误差会引起该系数的变化,同时该方法需要近红外路径与微波路径的交点位于路径中点位置,而实际测量中很难满足此要求。

3.4 通量源区评价的不确定性

目前所使用的通量源区模型对平坦均匀下垫面条件适用性强,在复杂的下垫面条件下则有许多限制,如有效高度的限制、粗糙度的变化、大气稳定度的变化等[64-65]。2002 年 Meijninger[65] 首次将源区模型应用至光闪烁方法测量结果的分析,并认为由于源区的不同,观测结果存在 8%左右的误差。区域尺度范围内,由于通量源区的变化导致蒸散估算偏差会高达 26%[43],Ward 等[44] 也认为由于源区的改变而造成湍流通量的低估也是引起测量结果不准确的原因。青藏高原不同空间尺度的研究表明,风向和通量源区的不同会导致结果的差异,并说明通量源区不重合时,涡动相关方法与 LAS 观测结果差异显著[17],对蒸散的影响最大可达 23%左右。Evans 和 De Bruin[53] 认为使用源区函数对结果进行评估时必须考虑源区函数模型的适用条件,并指出 Schuepp 模型只适合在平坦下垫面,复杂起伏地形条件下风向会引起较大的误差,源区函数经过修正后得到的结果更好[35-36]。应用源区模型应考虑观测高度、风速风向、下垫面的粗糙程度以及大气稳定度等因素影响,不同气象条件下的源区分布不同,并且源区内的通量贡献值各不相同,在非均匀下垫面条件下还应依据源区函数对最终结果进行修正。光闪烁方法测量区域尺度通量时,由于下垫面植被类型不同,各斑块地段对通量贡献也不相同,在评价过程中需进一步探讨。此外,双波长方法中由于两套系统的分离,在一定程度上会造成二者源区的不同,目前关于双波长方法的源区仍参考单波长方法,这也增加了结果的不确定性。

4 结论与展望

应用光闪烁方法的实验结果表明,光闪烁方法可以获得区域水平上的平均水热通量,由于平均时间比涡动相关方法短,因而其统计不确定性小。下垫面均匀时,光闪烁法的测量结果与涡动相关方法测量结果十分一致;而在非均匀下垫面条件下,充分考虑风向与通量源区的影响后,光闪烁方法也可以取得很好的结果,尤其是与涡动相关方法联合使用不仅能获得更好的区域平均蒸散结果,而且也能精确评估各源区的蒸散水平。综合看来,光闪烁方法具有如下优点:

(1)快速测算出公里尺度路径上的平均水热通量,在复杂下垫面条件下更具优势;

(2)是目前卫星遥感模型反演验证的最佳地面实测方法;

(3)具有较高的时间分辨率,空间代表性强;

(4)具有在复杂天气条件下全天候连续观测的能力。

就光闪烁方法而言,单波长方法发展更为成熟,已经完全实现了商业化。单波长方法测算蒸散需额外配备净辐射、土壤热通量等能量传感器,通过能量平衡公式计算得出蒸散[29,34,43],但其中过程变量如净辐射、土壤热通量等与光闪烁方法的测量路径(公里尺度)存在空间差异性[26,35]。单波长方法选用的近红外波段会受到湿度的影响,计算时通常参考 Wesely 引入的波文比修正系数[53],并没有考虑实时的湿度变化,通过能量平衡计算蒸散的精确性尚需提高[14,29,33]。双波长方法同时测量观测区域的温湿度变化,一定程度上消除了单波长方法计算蒸散过程中存在的空间差异性以及湿度变化的影响。虽然双波长方法的发展起步较晚,研究报道中所用的双波长仪器大多为实验室自行研发,商业化仪器较为少见,价格较为昂贵,普及程度不及单波长方法的仪器,但是双波长方法简化了蒸散测算的过程,实现了对蒸散的直接测量,在未来高精度的区域通量研究

中具有更大的优势。

总之,光闪烁方法在短短几十年间得到了迅速发展,并成为区域蒸散研究领域的重要方法,特别是双波长方法在非均匀地表蒸散观测研究中表现出了巨大的发展潜力。光闪烁法不仅实现了区域通量的连续观测,同时也验证了遥感反演结果,改善了遥感模型参数,为区域尺度上的水资源管理做出了重要贡献,但光闪烁方法还存在如信号饱和、相似函数选择等不确定性。如何在最大程度上减少不确定性,作者认为可以从下述几点进行进一步的研究。

(1)光闪烁方法在理论方面的研究。主要包括光闪烁方法在测算由于频率损耗等原因引起的湍流谱修正,饱和效应修正,水汽吸收效应修正,结合湍流谱分析与涡动相关方法观测构造合适的相似函数。

(2)计算过程中关键参数的确定以及源区分析。主要包括复杂下垫面条件下粗糙度、摩擦风速、有效高度等参数的确定,复杂地形条件下的源区分析等。

(3)其他方面的研究。如光路径上存在的气溶胶吸收影响、双波长方法中仪器分离造成的路径权重函数分离、光闪烁方法测算结果的验证等。

致谢:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所王介民研究员给予帮助,特此致谢。

参考文献(References):

[1] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008.

[2] 赵丽雯,赵文智,吉喜斌. 西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律. 生态学报, 2015, 35(4): 1114-1123.

[3] 桑玉强,张劲松. 华北山区核桃液流变化特征及对不同时间尺度参考作物蒸散量的响应. 生态学报, 2014, 34(23): 6828-6836.

[4] 董李勤,章光新,张昆. 嫩江流域湿地生态需水量分析与预估. 生态学报, 2015, 35(18): 6165-6172.

[5] 白岩,朱高峰,张琨,马婷. 基于树干液流及涡动相关技术的葡萄冠层蒸腾及蒸散发特征研究. 生态学报, 2015, 35(23): 7821-7831.

[6] 刘玉莉,江洪,周国模,陈云飞,孙成,杨爽. 安吉毛竹林水汽通量变化特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2014, 34(17): 4900-4909.

[7] 孙成,江洪,陈健,刘玉莉,牛晓栋,陈晓峰,方成圆. 亚热带毛竹林生态系统能量通量及平衡分析. 生态学报, 2015, 35(12): 4128-4136.

[8] 蒋冲,穆兴民,马文勇,于新洋,刘宪锋,李建国,刘思洁,王飞. 秦岭南北地区绝对湿度的时空变化及其与潜在蒸发量的关系. 生态学报, 2015, 35(2): 378-388.

[9] 钱多,查天山,吴斌,贾昕,秦树高. 毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析. 生态学报, 2017, 37(6): 1966-1974.

[10] 李新,刘绍民,马明国,肖青,柳钦火,晋锐,车涛,王维真,祁元,李弘毅,朱高峰,郭建文,冉有华,闻建光,王树果. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计. 地球科学进展, 2012, 27(5): 481-498.

[11] 欧阳志云,张路,吴炳方,李晓松,徐卫华,肖燚,郑华. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系. 生态学报, 2015, 35(2): 219-226.

[12] 辛晓洲,田国良,柳钦火. 地表蒸散定量遥感的研究进展. 遥感学报, 2003, 7(3): 233-240.

[13] 张荣华,杜君平,孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307.

[14] Xu Z W, Liu S M, Li X, Shi S J, Wang J M, Zhu Z L, Xu T G, Wang W Z, Ma M G. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the HiWATER-MUSOEXE. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2013, 118(23): 13140-13157.

[15] 施生锦,黄彬香,刘绍民,杨燕,黄勇彬,徐自为. 大尺度水热通量观测系统的研制. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1128-1138.

[16] 刘绍民,李小文,施生锦,徐自为,白洁,丁晓萍,贾贞贞,朱明佳. 大尺度地表水热通量的观测、分析与应用. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1113-1127.

[17] 孙根厚,胡泽勇,王介民,刘火霖,谢志鹏,蔺筠,黄芳芳. 那曲地区两种空间尺度感热通量的对比分析. 高原气象, 2016, 35(2): 285-296.

[18] Andreas E L. Three-wavelength method of measuring path-averaged turbulent heat fluxes. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(6): 801-814.

[19] Lüdi A, Beyrich F, Mätzler C. Determination of the turbulent temperature-humidity correlation from scintillometric measurements. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 117(3): 525-550.

[20] Kohsiek W. Measuring $C_T{}^2$, $C_Q{}^2$ and C_{TQ} in the unstable surface layer and relations to the vertical fluxes of heat and moisture. Boundary-Layer Meteorology, 1982, 24(1): 89-107.

[21] Hill R J, Ochs G R. Surface-layer micrometeorology by optical scintillation techniques//Remote Probing of the Atmosphere, Technical Digest of the Topical Meeting on Optical Techniques for Remote Probing of the Atmosphere. Washington, D.C.: Optical Society of America, 1983: 161-164.

[22] McAneney K J, Green A E, Astill M S. Large-aperture scintillometry: the homogeneous case. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 76(3/4): 149-162.

[23] Cain J D, Rosier P T W, Meijninger W, De Bruin H A R. Spatially averaged sensible heat fluxes measured over barley. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4): 307-322.

[24] Kohsiek W, Meijninger W M L, Moene A F, Heusinkveld B G, Hartogensis O K, Hillen W C A M, De Bruin H A R. An extra large aperture scintillometer for long range applications. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 119-127.

[25] Hoedjes J C B, Zuubier R M, Watts C J. Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area, partly affected by regional advection. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 99-117.

[26] Beyrich F, De Bruin H A R, Meijninger W M L, Schipper J W, Lohse H. Results from one-year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogeneous land surface. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 85-97.

[27] 范雄, 邓彪. 利用 LAS 资料估算能量平衡各分量. 四川气象, 2002, 22(4): 30-31.

[28] 胡丽琴, 吴蓉璋, 方宗义. 大口径闪烁仪及其在地表能量平衡监测中的应用. 应用气象学报, 2003, 14(2): 197-205.

[29] 陈继伟, 左洪超, 王介民, 王树金, 陈伯龙, 庄少伟. LAS 在西北干旱区荒漠均匀下垫面的观测研究. 高原气象, 2013, 32(1): 56-64.

[30] You Q G, Xue X, Peng F, Dong S Y, Gao Y H. Surface water and heat exchange comparison between alpine meadow and bare land in a permafrost region of the Tibetan Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 48-65.

[31] Meijninger W M L, De Bruin H A R. The sensible heat fluxes over irrigated areas in western Turkey determined with a large aperture scintillometer. Journal of Hydrology, 2000, 229(1/2): 42-49.

[32] Yee M S, Pauwels V R N, Daly E, Beringer J, Rüdiger C, McCabe M F, Walker J P. A comparison of optical and microwave scintillometers with eddy covariance derived surface heat fluxes. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 213: 226-239.

[33] Al-Gaadi K A, Patil V C, Tola E, Madugundu R, Gowda P H. Evaluation of METRIC-derived ET fluxes over irrigated alfalfa crop in desert conditions using scintillometer measurements. Arabian Journal of Geosciences,2016, 9(6): 441-452.

[34] Hemakumara H M, Chandrapala L, Moene A F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. Agricultural Water Management, 2003, 58(2): 109-122.

[35] 张劲松, 孟平, 郑宁, 黄辉, 高峻. 大孔径闪烁仪法测算低丘山地人工混交林显热通量的可行性分析. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1283-1290.

[36] Chehbouni A, Watts C, Lagouarde J P, Kerr Y H, Rodriguez J C, Bonnefond J M, Santiago F, Dedieu G, Goodrich D C, Unkrich C. Estimation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1/3): 215-226.

[37] 郝小翠, 张强, 杨泽粟. 陇东黄土高原下垫面不均匀性指标的建立及其对大孔径闪烁仪(LAS)观测感热通量的影响. 地球物理学报, 2016, 59(3): 816-827.

[38] Watts C J, Chehbouni A, Rodriguez J C, Kerr Y H, Hartogensis O, De Bruin H A R. Comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer measurements over semi-arid grassland in northwest Mexico. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105(1/3): 81-89.

[39] Majozi N P, Mannaerts C M, Ramoelo A, Mathieu R, Mudau A E, Verhoef W. An intercomparison of satellite-based daily evapotranspiration estimates under different eco-climatic regions in South Africa. Remote Sensing, 2017, 9(4): 307.

[40] Kohsiek W, Herben M H A J. Evaporation derived from optical and radio-wave scintillation. Applied Optics, 1983, 22(17): 2566-2570.

[41] Hill R J, Bohlander R A, Clifford S F, McMillan R W, Priestly J T, Schoenfeld W P. Turbulence-induced millimeter-wave scintillation compared with micrometeorological measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(3): 330-342.

[42] McMillan R W, Bohlander R A, Baldygo W J Jr. Millimeter-wave atmospheric turbulence measurements: instrumentation, selected results, and system effects. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1997, 18(1): 233-258.

[43] Meijninger W M L, Beyrich F, Lüdi A, Kohsiek W, De Bruin H A R. Scintillometer-based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface-a contribution to LITFASS-2003. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121(1): 89-110.

[44] Ward H C, Evans J G, Grimmond C S B. Infrared and millimetre-wave scintillometry in the suburban environment-Part 2: Large-area sensible and latent heat fluxes. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(3): 1407-1424.

[45] 舒婷. 微波闪烁法测量潜热通量的初步研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2012.

[46] De Bruin H A R, Wang J M. Scintillometry: a review. [2017-04-21]. https://www.researchgate.net/publication/316285424.

[47] Kohsiek W, Meijninger W M L, De Bruin H A R, Beyrich F. Saturation of the large aperture scintillometer. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121(1): 111-126.

[48] Kleissl J, Hartogensis O K, Gomez J D. Test of scintillometer saturation correction methods using field experimental data. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 137(3): 493-507.

[49] 张功. 自制大孔径闪烁仪饱和规律及修正研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015.

[50] Van Kesteren B, Hartogensis O K. Analysis of the systematic errors found in the Kipp & Zonen large-aperture scintillometer. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 138(3): 493-509.

[51] Kleissl J, Gomez J, Hong S H, Hendrickx J M H, Rahn T, Defoor W L. Large aperture scintillometer intercomparison study. Boundary-Layer Meteorology, 2008, 128(1): 133-150.

[52] Green A E, Astill M S, McAneney K J, Nieveen J P. Path-averaged surface fluxes determined from infrared and microwave scintillometers. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109(3): 233-247.

[53] Evans J G, De Bruin H A R. The effective height of a two-wavelength scintillometer system. Boundary-Layer Meteorology, 2011, 141(1): 165-177.

[54] Konzelmann T, Calanca P, Müller G, Menzel L, Lang H. Energy balance and evapotranspiration in a high mountain area during summer. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36(7): 966-973.

[55] Wesely M L. The combined effect of temperature and humidity fluctuations on refractive index. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(1): 43-49.

[56] Ward H C, Evans J G, Hartogensis O K, Moene A F, De Bruin H A R, Grimmond C S B. A critical revision of the estimation of the latent heat flux from two-wavelength scintillometry. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2013, 139(676): 1912-1922.

[57] Hartogensis O K, Watts C J, Rodriguez J C, De Bruin H A R. Derivation of an effective height for scintillometers: La Poza experiment in Northwest Mexico. Journal of Hydrometeorology, 2003, 4(5): 915-928.

[58] Wyngaard J C, Izumi Y, Collins S A Jr. Behavior of the refractive-index-structure parameter near the ground. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(12): 1646-1650.

[59] Andreas E L. Estimating C_n^2 over snow and sea ice from meteorological data. Journal of the Optical Society of America A, 1988, 5(4): 481-495.

[60] Hill R J, Ochs G R, Wilson J J. Measuring surface-layer fluxes of heat and momentum using optical scintillation. Boundary-Layer Meteorology, 1992, 58(4): 391-408.

[61] Hartogensis O K, De Bruin H A R. Monin-obukhov similarity functions of the structure parameter of temperature and turbulent kinetic energy dissipation rate in the stable boundary layer. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 116(2): 253-276.

[62] Li D, Bou-Zeid E, De Bruin H A R. Monin-obukhov similarity functions for the structure parameters of temperature and humidity. Boundary-Layer Meteorology, 2012, 145(1): 45-67.

[63] 郑宁. 闪烁仪法准确测算森林生态系统显热通量的湍流理论分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.

[64] Schuepp P H, Leclerc M Y, MacPherson J I, Desjardins R L. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. Boundary-Layer Meteorology, 1990, 50(1/4): 355-373.

[65] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W, Hoedjes J C B, Zuurbier R M, De Bruin H A R. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105(1): 37-62.